

Schlussbericht

INTEGRAL

Zuwendungsempfänger: ARNELL Arno Hentschel GmbH	Förderkennzeichen: 19I20009C
Förderprogramm: Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien	
Titel des Vorhabens: Integratives Leichtbaudach für Schienenfahrzeuge; Teilvorhaben: Technologieentwicklung, Test	
Projektleiter: Thomas Scholz Tel.: 03583/549970 E- Mail: thomas.scholz@arnell.de	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2020 bis 31.12.2023	
Projektpartner: <ul style="list-style-type: none">• Hörmann Vehicle Engineering GmbH (Federführer)• RCS GmbH Rail Components and Systems• Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU• Heiterblick GmbH (assoziiertes Partner)	
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	
Projektträger: TÜV Rheinland Consulting GmbH	

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung	3
1 Aufgabenstellung	3
1.1 Gesamtprojektzielstellung.....	3
1.2 Aufgaben Teilprojekt Arno Hentschel GmbH	4
2 Voraussetzungen.....	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4 Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
II. Eingehende Darstellung	7
1 Projektergebnisse.....	7
1.1 Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger (AP 5)....	7
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	23
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	23
4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	23
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	23
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	24
III. Erfolgskontrollbericht.....	25
IV. Kurzfassung (Berichtsblatt)	26

I. Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

1.1 Gesamtprojektzielstellung

Das primäre Ziel des Verbundvorhabens besteht in der Entwicklung und serientauglichen Fertigung wettbewerbsfähiger Schienenfahrzeugdächer in Faserkunststoffverbund-(FKV)-Leichtbauweise mit folgenden Besonderheiten im Vergleich zu konventionellen metallischen Dachstrukturen:

- Wesentliche Gewichtsreduzierung (Ziel: -40 % Gewicht) bei gleichen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften,
- geringerer Montageaufwand (Ziel: -70 % Montagekosten) durch eine kompakte, funktionsintegrierte FKV-Bauweise sowie
- serientaugliche und wirtschaftliche Fertigungs- und Montageprozesse (bisher: manuelle und ressourcenintensive Fertigung unter Zuhilfenahme von Metallhalbzeugen).

Die Masseoptimierung von Schienenfahrzeugdächern zielt in erster Linie auf eine Reduzierung der erforderlichen Antriebsenergie, führt allerdings auch zu zahlreichen positiven Nebeneffekten, wie etwa geringeren Betriebskosten, besserem Fahrverhalten, geringeren Wartungskosten und höheren Reichweiten batteriebetriebener Fahrzeuge. Die Erzielung eines hohen Leichtbaugrades der Dachstruktur wird durch konsequente Ausnutzung des Stoff- und Strukturleichtbaus mit belastungsgerechten FKV-Bauweisen sowie des Funktionsleichtbaus durch die Integration von Anbauteilen und Lasteinleitungen erreicht. Zur Gewährleistung der zwingend erforderlichen Wettbewerbsfähigkeit liegt der FuE-Schwerpunkt sowohl auf der Umsetzung materialeffizienter bzw. funktionsintegrierter Bauweisen mit minimalem Montageaufwand als auch auf der Bereitstellung wirtschaftlicher, serientauglicher Fertigungs- und Fügetechnologien.

Zur Demonstration der konstruktiven und technologischen Projektergebnisse wird eine prototypische FKV-Leichtbaudachstruktur für moderne Straßenbahnen mittels seriennaher Technologien hergestellt. Der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten liegt dabei auf Dachstrukturen für moderne Niederflurstraßenbahnen, da diese das größte Potential, allerdings auch den höchsten FuE-Bedarf, zur Einführung integrativer Leichtbaudachstrukturen aufweisen.

Die Innovation und der besondere industrielle Nutzen dieses Verbundvorhabens basieren auf der ganzheitlichen Betrachtung, von der Entwicklung hochintegrativer Leichtbauweisen für Schienenfahrzeugdächer unter Berücksichtigung eines wettbewerbsfähigen Materialeinsatzes bis hin zur Technologieentwicklung eines angepassten, wirtschaftlichen Fertigungsverfahrens.

1.2 Aufgaben Teilprojekt Arno Hentschel GmbH

Die Arno Hentschel GmbH war verantwortlich für die Bearbeitung der Arbeitspakete AP 5 und anteilig AP 12. Die spezifischen Aufgabenstellungen sind im Folgenden dargestellt.

AP 5: Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger

An die zukünftigen FKV-Dachstrukturen in Straßenbahnen werden hohe Ansprüche gestellt. Um beispielsweise verschiedene Antriebskonzepte integrieren und sicher befestigen zu können, müssen die Lasteinleitungselemente den Anforderungen entsprechend ausgelegt werden. Neben den technischen Anforderungen fließt das Herstellungsverfahren mit in die Betrachtung ein. Es wird eine Stanzlösung als großserientaugliches Fertigungsverfahren favorisiert. Dazu wird ein Konzept für ein werkstoffgerechtes Lasteinleitungselement entwickelt, sowie ein passendes Stanzwerkzeug konstruiert. Im Anschluss wird dieses getestet in Form von Stanzversuchen und daraus Verbesserungen abgeleitet. Für den Demonstrator werden Metalleinleger hergestellt, welche dann in diesen mit eingebaut werden.

2 Voraussetzungen

Die Arno Hentschel GmbH (ARNELL) ist seit über 70 Jahren erfolgreich im Bereich der Metall- und Blechverarbeitung am Markt etabliert. Seit mehr als 50 Jahren entwickelt und produziert das Unternehmen Umformwerkzeuge für kontinuierliche und stationäre Stanz-/Biegeprozesse, unter anderem in der Folgeverbundtechnik. Das Unternehmen zählt weltweit als anerkannter Hersteller von metallischen Befestigungselementen und bietet branchenübergreifend flexible Lösungen für hochwertige Metallbaugruppen. ARNELL engagiert sich aktiv seit 2018 im Geschäftsfeld der additiven Fertigung (Metall-3D-Druck) mit dem Ziel der Herstellung geometrie- und belastungsangepasster Metallkomponenten zur Reduzierung des Energie- und Ressourcenbedarfs bewegter Elemente. Metallinserts als Krafteinleitungselemente für FKV-Leichtbauteile mittels additiver Fertigung herzustellen, stellt für ARNELL eine zielkonforme Forschungstätigkeit dar. Das Unternehmen bietet aus der Kombination der Stanztechnik und der additiven Fertigung daher hervorragende Voraussetzungen zur Entwicklung und erfolgreichen Umsetzung integrationsgerechter Metallkomponenten für das Schienenfahrzeugdach in FKV-Leichtbauweise.

Das Wissen aus den Bereichen Stanztechnik, die jahrelange Erfahrung im Bereich Werkzeugbau und die neu gewonnen Erkenntnisse in dem Bereich Schneid-, Kantteilen sowie Schweißbaugruppen fließen in das Projekt Integral direkt mit ein.

Durch den Firmenumzug des Unternehmens von Oderwitz nach Zittau, wurde gleichzeitig der Maschinenpark erweitert, sodass auch eine Prototypenfertigung der Inserts, über das Wasserstrahlschneiden möglich wurde. Eine weitere Investition im Jahr 2023 - die Anschaffung eines Schweißroboters, macht nun die komplette Fertigung des Metalleinlegers im eigenen Haus möglich.

Die geplanten personellen und finanziellen Ressourcen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Gesamtkostenübersicht ARNELL in T€

Personal- aufwand [MM]	Personal inkl. GK	Reise- kosten	Material	Investitio- nen	Unter- aufträge	Sonstiges	Gesamt- kosten
20,5	131.440,60	3.260	15.330	5.833,30	0,00	25.100	180.963,90

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

ARNELL hat das Arbeitspaket 5 und Arbeitspaket 12 in dem vorgegebenen Zeitraum planmäßig abgeschlossen. Der Ablauf für das Projekt INTEGRAL ist in der unteren Abbildung 1 dargestellt. Die zeitliche Verlängerung des Projektes hatte keinen Einfluss auf die Bearbeitung der Arbeitspakete von ARNELL, ist jedoch für den erfolgreichen Abschluss des Projektes zwingend notwendig gewesen. Aufgrund der Lieferschwierigkeiten bzw. der Beschaffung eines geeigneten Prüfstandes für das Dachsegment.

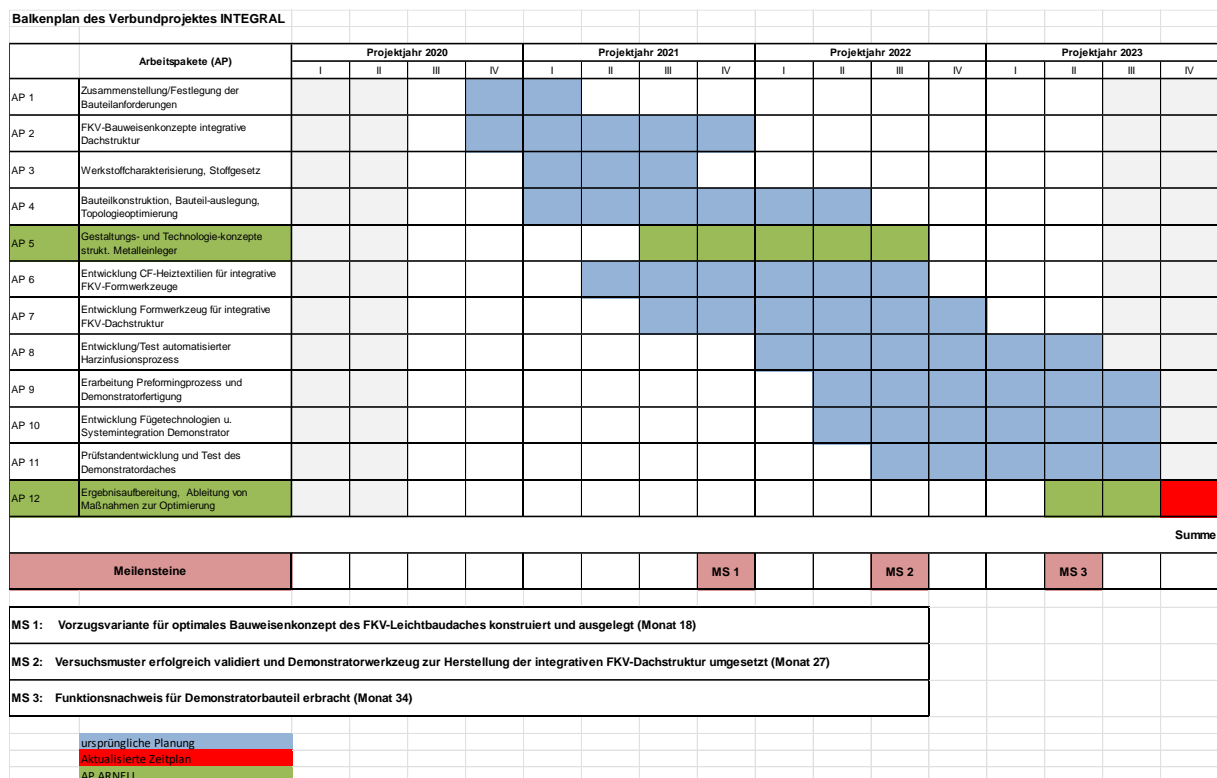


Abbildung 1: Arbeitsplan mit Darstellung der Änderungen während des Projektverlaufs

4 Stand der Wissenschaft und Technik

In der Schienenfahrzeugindustrie ist der Stand der Technik der metallische Wagenkasten. Diese Bauweise wird daher auch im Bereich Stadt- und Straßenbahnen angewendet. Aufbauten am Dach wie z.B. Stromabnehmer oder Klimaanlage werden an die Wagenkonstruktion angeschraubt. Dafür werden Befestigungspunkte, je nachdem, was auf dem Dach befestigt werden soll mithilfe eines Hilfsrahmens oder Bolzen angebracht. Der Vorteil liegt darin, dass diese direkt über eine Schweißverfahren mit der Wagenkonstruktion verbunden werden können. Im Bereich GFK und Kunststoffverbundkonstruktionen ist dies nicht so einfach möglich. Hier werden typischerweise sogenannte „Inserts“ verwendet. Diese werden über ein entsprechendes Fügeverfahren mit dem GFK oder Kunststoff verbunden. So wird ein fester Anschraubpunkt im Bauteil geschaffen. An diesem können dann die jeweiligen Bauteile sicher befestigt werden. Der Nachteil, der bestehenden Gewindeinserts liegt darin, dass diese durch Ihre Baugröße und der Fügeverbindung zwischen GFK/Kunststoff nur für kleine Bauteile geeignet sind. Aktuell gibt es kein Gewindeinsert, welches die Last und wirkenden Kräfte der Dachaufbauten bei einem Beschleunigungs- oder Bremsvorgang einer Straßenbahn aufnehmen kann.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Förderprojekt wurde gemeinschaftlich durch die Projektpartner Hörmann Vehicle Engineering GmbH (Federführer), RCS GmbH Rail Components and Systems, Fraunhofer Kunststoffzentrum Oberlausitz (FKO) und die Arno Hentschel GmbH (AH) bearbeitet. Die Heiterblick GmbH fungierte als assoziierter Partner. Darüber hinaus fand keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen statt.

II. Eingehende Darstellung

1 Projektergebnisse

1.1 Gestaltungs- und Technologiekonzepte integrationsgerechter Metalleinleger (AP 5)

1.1.1 Recherche

Zu Beginn der Bearbeitung des Arbeitspaketes wurde eine ausführliche Recherche zu bestehenden Lösungen im Bereich Lasteinleitung bzw. Befestigung für GFK- und Kunststoffbauteile durchgeführt. Die Recherche ergab, dass alle bestehenden Lösungen am Markt aus einem flachen Teller oder einer Platte meist mit einem in der Mitte angebrachten Zylinder der ein innen oder außen liegendes Gewinde hat, bestehen. In den flachen Tellern oder Platten sind zusätzlich Bohrungen eingebracht, welche den Harzfluss bzw. die Verbindung zum GFK verstärken, da das Harz in die Bohrungen fließt und so eine formschlüssige Verbindung zwischen Metalleinleger und GFK-Struktur schafft. (Abbildung 2)



Abbildung 2: Standard Befestigungselement GFK (<https://www.r-g.de/art/305156>)

1.1.2 Definition der Anforderungen an den Metalleinleger

Für die Auslegung und Konstruktion des Befestigungselementes ist es zunächst wichtig die Anforderungen an dieses zu definieren. Die wichtigsten Anforderungen werden im Folgenden aufgelistet:

- Krafteinwirkung durch Haltestangen: 1,5 kN
- Verwindung des Daches, Schwingungen und Stöße
- Korrosionsschutz
- Formschlüssige Einbettung und keine Mikrorisse (Vermeidung, dass Wasser eindringen kann)
- Kein direkter Kontakt zu Kohlefasern
- Verhinderung des Ausreißens der Befestigungselemente beim hängen bleiben des Pantographs
- Temperatur -25 °C bis 70 °C bei starker Sonneneinstrahlung
- Reinigung mit Hochdruckreiniger bis 200 bar möglich
- Gesamtkonzept Gewichtseinsparung 40 %

- einfache Montage- und Demontage der Dachaufbauten

1.1.3 Konzeptentwicklung für Metalleinleger

Für die Entwicklung des Befestigungssystems wurde sich an dem Stand der Technik (siehe 1.1.1 Recherche) und an der vorgegebenen Konstruktion des Dachelementes orientiert. Diese entspricht in etwa den Bauteilen auf dem Dach von Metallwagenkästen (siehe Abbildung 3)

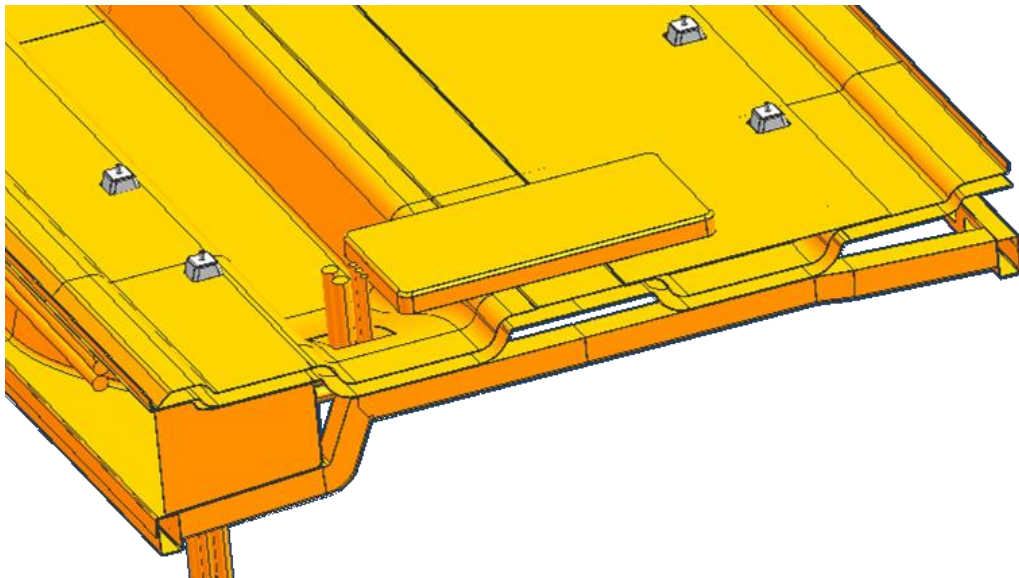


Abbildung 3: Dachsegment mit Lasteinleitungselementen

Die ersten Gedanken zum Konzept für die Einbindung des Metalleinlegers beinhalteten einen Grundkörper, der eine Verzahnung zur Verkrallung im Schaum enthält. Zusätzlich war eine Haube zum Aufschrauben vorgesehen, welche den Abstand zu den Aufbauten hält und diese nicht an der Dachstruktur kratzen lässt. Das Grundprinzip kann man der Abbildung 4 entnehmen.

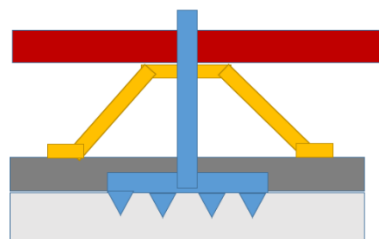


Abbildung 4: Erstkonzzept Metalleinleger

Bei der Gestaltung entwickelten sich zwei Grundkonzepte, welche in die Integralbauweise und Differentialbauweise unterschieden wurden. Mit der Integralbauweise ist gemeint, dass sich Grundstruktur und Gewindeelement in einem Bauteil befinden. Diese ist dann komplett in die FKV-Struktur eingebettet. Bei der Differenzialbauweise sind die Grundstruktur und das Gewindeelement separat voneinander. Hierbei wird nur die Scheibe einlaminiert und das entsprechende Gewindestück (Bolzen/ Mutter/ Gewindehülse) wird nachträglich eingesetzt.

1.1.3.1 Konzeptentwicklung nach den Fertigungsmöglichkeiten

Auf Grundlage der Fertigungsmöglichkeiten bei ARNELL sind verschiedene Konzepte entwickelt worden. Die Fertigungsmöglichkeiten bei ARNELL erstrecken sich vom klassischen Stanzen, zur CNC-Bearbeitung bis hin zur Additiven Fertigung. In Absprache mit den Partnern wurde außerdem beschlossen, dass die Metalleinleger an der unteren und oberen GFK-Schicht angebunden werden sollen. Diese Anforderung wurde bei der Erstellung der Konzepte berücksichtigt. So entstanden eine Stanz-Variante, eine Dreh-Fräs-Variante und drei Additive-Varianten.

Die erste Variante ist das klassische Stanzteil, wobei ein Teller mit aufgestellten Spitzen aus einem Blech gestanzt werden soll. Auf der unteren Scheibe wird eine Mutter mittels Schweißen befestigt. Die obere Scheibe enthält nur eine Bohrung für den Gewindebolzen. Die aufgestellten Spitzen dienen der Verkrallung im Schaum, damit die komplette Baugruppe besser in Lage gehalten wird. Die Montage des Inserts kann von oben erfolgen. Im Anschluss wird die Gewindestab montiert.

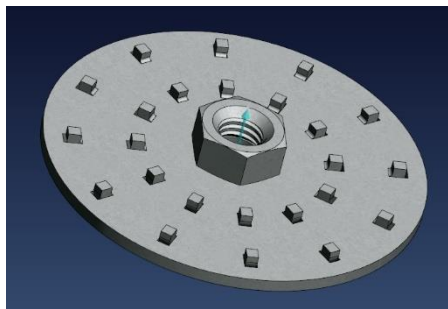


Abbildung 5: Unterteil Stanzvariante

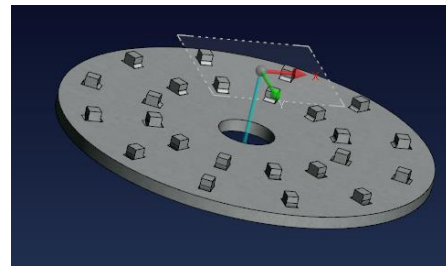


Abbildung 6: Oberteil Stanzvariante

Bei Variante 2 handelt es sich um ein Dreh-Frästeil, welches aus einem vollen Halbzeug hergestellt wird. An diesem wird ein oberer und unterer Flansch angedreht - zur Anbindung an die obere und untere GFK-Schicht. In der Mitte befindet sich eine Gewindebohrung. An dieser können die Aufbauten direkt befestigt werden. Vorteil dieser Variante ist, dass an dem Bauteil ein Kegel angedreht ist. Dieser dient als Abstandshalter für die Aufbauten zum Dach. Nachteil bei dieser Variante ist, dass Sie seitlich in den Schaumkern eingeschoben werden muss und sich nicht von oben montieren lässt. Auch das hohe Gewicht ist problematisch zu bewerten.

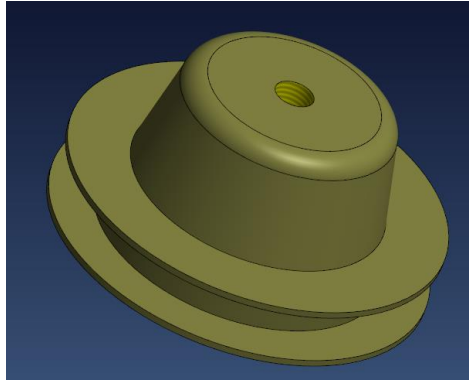


Abbildung 7: Dreh-Frästeil

Mit Variante 3 ist eine abgewandelte Version von Variante 2 angedacht. Dieses Bauteil könnte additiv hergestellt werden, wobei eine große Gewichtseinsparung möglich wäre, wenn das Bauteil innen hohl bzw. nur mit Füllstruktur ausgeführt wird. Äußerlich ähnelt dieser sehr stark Variante 2.

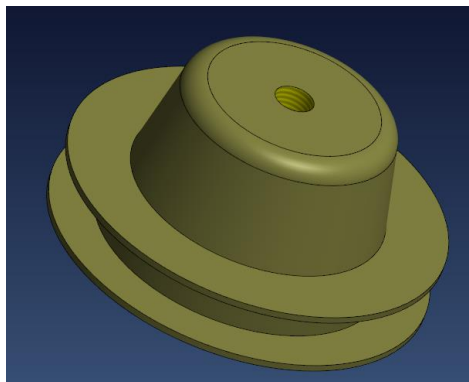


Abbildung 8: Dreh-Frästeil Additiv

Eine weitere Additive Variante ist das Konzept 4. Hier ist eine exotische Formgebung mit Widerhaken angedacht. Die Form lässt sich nur mithilfe eines 3D-Druckers herstellen. Die Widerhaken sollen sich dabei in die GFK-Matten verkralen und dem Bauteil zusätzlichen Halt geben. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist das Gewicht. Durch die additive Fertigung kann das Bauteil hohl ausgelegt werden, wodurch sich viel Material und damit Gewicht einsparen lässt. Nachteil an dieser Variante, ist die Montage im Dachsegment. Diese wird durch die Widerhaken nur beschwerlich funktionieren bzw. müsste der Schaumkern sehr an die Form angepasst werden. Dies würde den Montageprozess sehr aufwändig und langwierig gestalten.

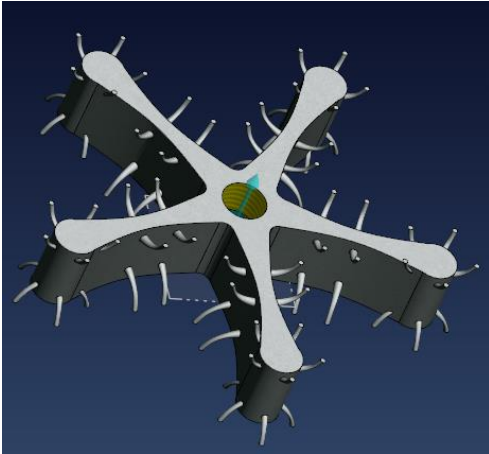


Abbildung 9: Konzept 4 Additiv

Variante 5 ist ebenso eine Additive Variante, welche sich an Variante 1 orientiert. Hier werden wieder zwei Scheiben in den Schaumkern eingesetzt. Die untere Scheibe besitzt ein Gewinde und die obere Scheibe weist Zähne auf, welche sich im Schaum verkrallen sollen.

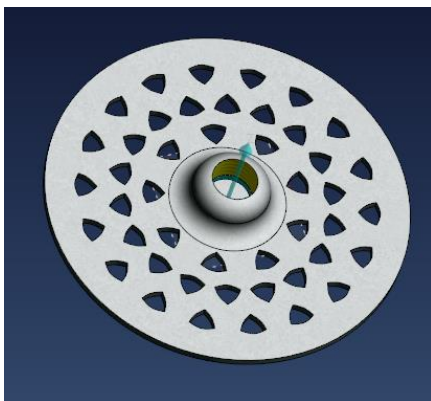


Abbildung 10: Unterteil Additiv

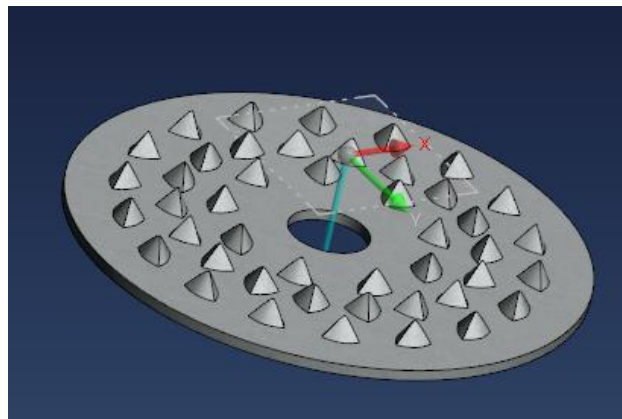


Abbildung 11: Unterteil Additiv

Tabelle 2: Vor- und Nachteile Konzepte

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Art	Stanzteil	Dreh-Frästeil	Additiv 1	Additiv 2	Additiv 3
Material	Stahl	Stahl/ Alu	Stahl/ Alu	Stahl/Alu	Stahl/Alu
Gewicht	1 kg	6,7 kg/ 2,2 kg	1,7 kg/ 0,5 kg	1 kg/ 0,3 kg	0,7 kg/ 0,2 kg
Vorteil	Geringes Gewicht Einfache Montage	Abstand zu Aufbauten durch Kegel	Abstand zu Aufbauten durch Kegel Geringes Gewicht	Geringes Gewicht Stabile Form	Geringes Gewicht Einfache Montage
Nachteil	Aufbau liegt direkt auf dem Dach auf	Hohes Gewicht Schlechte Montage	Schlechte Montage	Schlechte Montage	Aufbau liegt direkt auf dem Dach auf

1.1.4 Ableitung des Vorzugskonzeptes

Aus wirtschaftlichen Aspekten und unter dem Gesichtspunkt der Herstellbarkeit bei ARNELL wurde sich für das Grundprinzip vom Aufbau des Metalleinlegers ähnlich der Konzeptvariante 1 entschieden. Mit einigem konstruktiven Anpassungen ist diese Variante prototypisch gefertigt worden. Die Baugruppe wurde dahingegen geändert, dass in der Mitte ein Bolzen die beiden Metalleinleger (Oben und Unten) verbindet. Zur Fixierung der Metalleinleger werden diese mit Hilfe einer Schraube am Bolzen befestigt. So ist die Lage der Scheiben in Z-Richtung gesichert. Am oberen Schaft des Bolzens befindet sich ein Gewinde. Dieses dient zum Anschrauben der Dachaufbauten. Der Aufbau des Metalleinlegers zeigt die Abbildung 12.

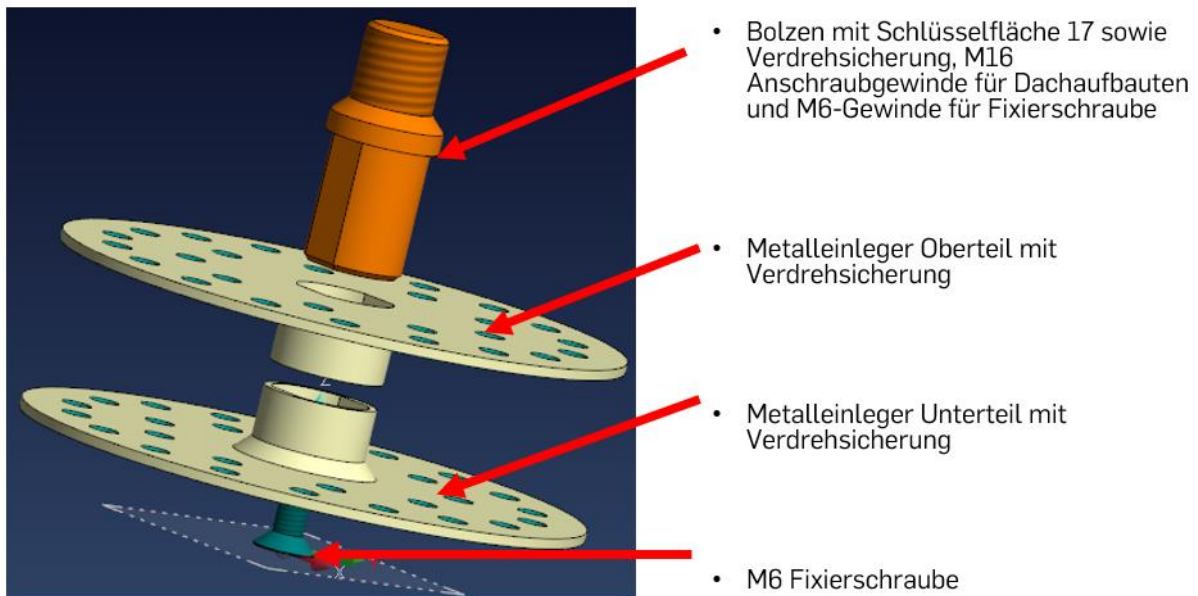


Abbildung 12: Aufbau des Metalleinlegers

Der Metalleinleger besteht aus dem Metalleinleger Unterteil, Bolzen, Metalleinleger Oberteil und der Fixierschraube. In die Scheibe des oberen und unteren Metalleinlegers wird jeweils ein an die Geometrie angepasster Schweiß­ein­satz des Bolzens eingeschweißt. An dem Bolzen und den Schweiß­ein­sä­tz­en ist eine Schlüssel­fläche angebracht, diese dient als Verdrehsicherung im für den Aufbau im Dachsegment. Von diesem Typen Metalleinleger wurden zwei Varianten gefertigt. Die eine Variante wies Löcher in den Scheiben auf und die andere verfügte über aufgestellte Dreiecke, welche als Verkrallung in den Schaum dienen. Diese Metalleinleger wurden einer mechanischen Prüfung unterzogen, wobei eine Belastung auf Zug, Druck und Schub erfolgte. Dabei wurde u.a. bewertet, inwieweit eine Verkrallung in den Schaum auf die Messer­er­geb­nisse Einfluss nimmt, ebenso der Durchmesser der Scheibe. Unter 1.1.6 stehen die ausführlichen Ergebnisse.

Prototyp Metalleinleger



Gewicht der beiden Baugruppen liegt bei ca. 0,4 kg
Maße: Ø110x51 mm

Abbildung 13: Varianten Metalleinleger

1.1.5 Aufbau Dachsegment

Das Dachsegment besteht aus einem Schaumkern und zwei GFK-Schichten. In diesen Schichten wird der Metalleinleger eingebracht. In der Abbildung 14 sieht man den Aufbau. Der Aufbau wird über den „Vari-Prozess“ mit Harz infiltriert und so stoffschlüssig miteinander verbunden. Dabei wird das Harz unter einem Vakuum durch das Bauteil gesaugt. Der VARI-Prozess ist ausführlich bei unserem Partner FKO beschrieben.

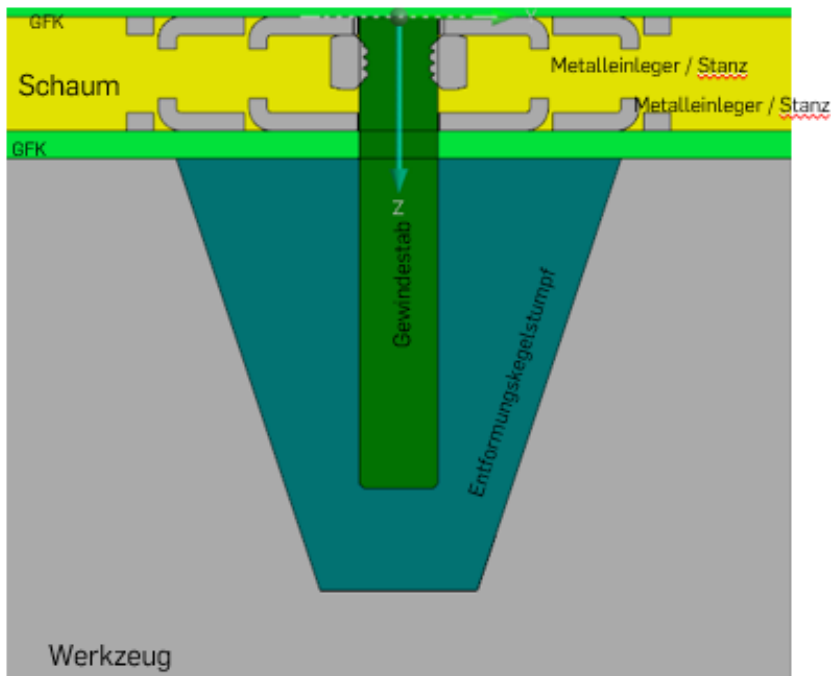


Abbildung 14: Aufbau Dachsegment mit Metalleinleger

1.1.6 Erste mechanische Überprüfung der Metalleinleger

Zur Vorbereitung der mechanischen Überprüfungen wurden Zugproben mit integrierten Metalleinlegern hergestellt. Dafür wurde am Fraunhofer-Institut unter der Anwendung des Vari-Prozesses acht Zugproben in der Bauweise der späteren Dachstruktur hergestellt (siehe Abbildung 15). Die Proben wurden anschließend auf die mechanischen Belastungen Zug, Druck und Scherung beansprucht (siehe Abbildung 16).

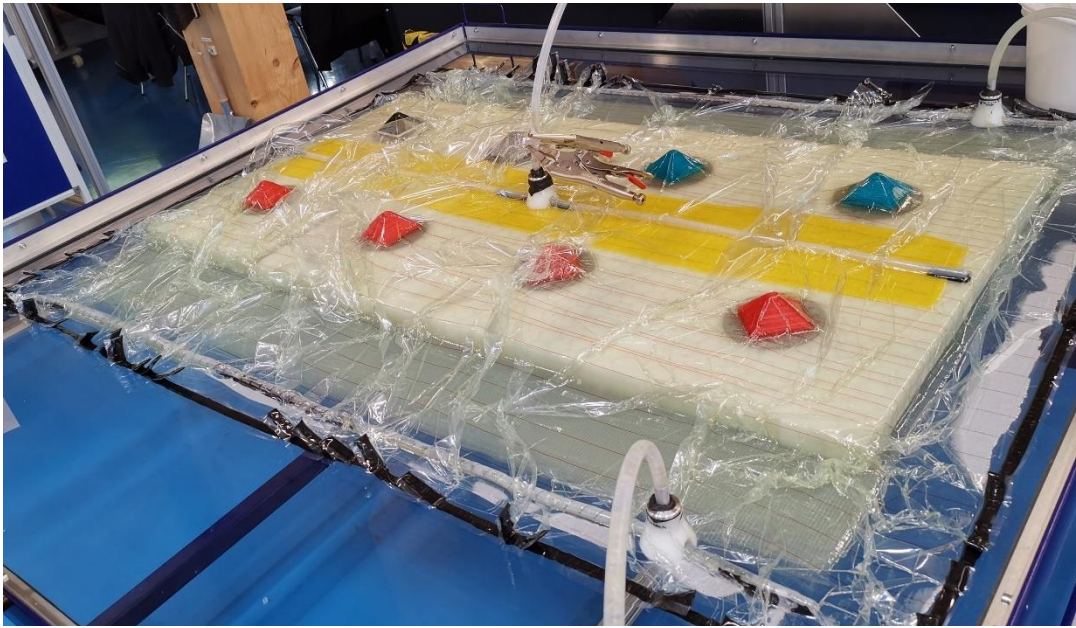


Abbildung 15: Vari-Prozess Herstellung Zugproben

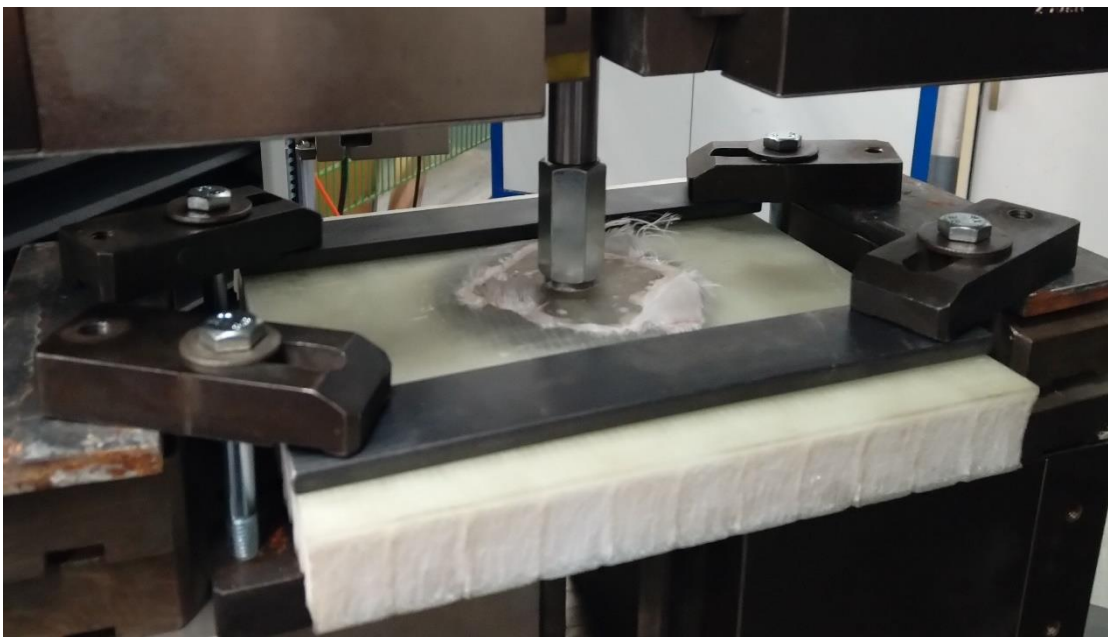


Abbildung 16: Zugversuch

Ergebnisse der axialen Zugprüfung

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Proben-Nr.	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	t _{Prüfung} s
■	1	1	14000	6,6	14000	6,6	8,76
■	2	2	18100	21,5	17900	21,6	26,74
■	3	3	18700	25,4	18400	25,6	31,61
■	4	4	17700	36,0	17500	36,1	44,14

Abbildung 17: Prüfergebnisse axiale Zugprüfung

- Befestigungsschraube M6 mit Festigkeit 8.8 gibt nach
- Der Bolzen wird aus der Probe gezogen (siehe Abbildung 18)
- Vergleichswerte für M6 mit der Festigkeit 8.8 liegt die Kraft bei 4000 N in Achsrichtung



Abbildung 18: Ergebnis Zugprüfung

Ergebnisse der Querkraftprüfung

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Probenbezeichnung	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	t _{Prüfung} s
■	1	Probe 5	5390	14,9	5150	15,0	18,80
■	2	Probe 6	4660	4,1	4420	4,6	6,33
■	3	Probe 6 bis Zerstörung	4440	9,6	-	-	70,39
■	4	Probe 7	5200	17,4	4990	17,4	21,71
■	5	Probe 8	5430	4,7	5080	16,3	20,37

Abbildung 19: Prüfergebnisse Querprüfung

- Werkstoff des Bolzens: Werkzeugstahl 1.2379
- Zugfestigkeit unbehandelt: 860 N/mm²
- Vergleich M16 Schraube Festigkeit 8.8 R_m = 800 N/mm²
- Vergleichswert (siehe Quelle: Technisches Zeichnen, Hoischen Fritz, 2017, Berlin) laut Tabelle senkrecht zur Achsrichtung für M16 Gewinde bei Festigkeit 8.8 liegt bei 8000 N



Abbildung 20: Ergebnis Scherprüfung

Auswertung

- Auswahl eines geeigneten Werkstoffes für den Bolzen
- Teller Verkrallung in Schaum erzielt keinen positiven Effekt auf die mechanischen Eigenschaften des Metalleinlegers, somit reichen die Bohrungen aus. Damit kann genug Harz dazwischen durchfließen
- Größe des Tellers hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Krafteinleitung in die Sandwichstruktur, Berechnung des Durchmessers mit ggf. Verringerung des Durchmessers (Gewichtsreduktion)

1.1.7 Reduktion des Baugruppengewichts

Die Auswertung der ersten Zugversuche ergab, dass der Durchmesser der Teller keinen nennenswerten Einfluss auf die Kraftverteilung im Schaum hat. Die Größe der Fläche ist dabei nicht entscheidend. Ein Teller mit einem kleineren Durchmesser kann die Kraft genauso einleiten, wie ein größerer. Hier gibt es die Möglichkeit das Gewicht der Baugruppe zu verringern, indem entweder der Durchmesser der Scheibe oder die Materialstärke reduziert wird. Dies wurde anhand einer Topologieoptimierung und grafisch gestützten Berechnung und Simulation überprüft. Genau wie in den realen Test, wurden die Bauteile auf Zug, Druck und Scherung beansprucht. Die Randbedingungen der FE-Analyse sind in Abbildung 21 dokumentiert.

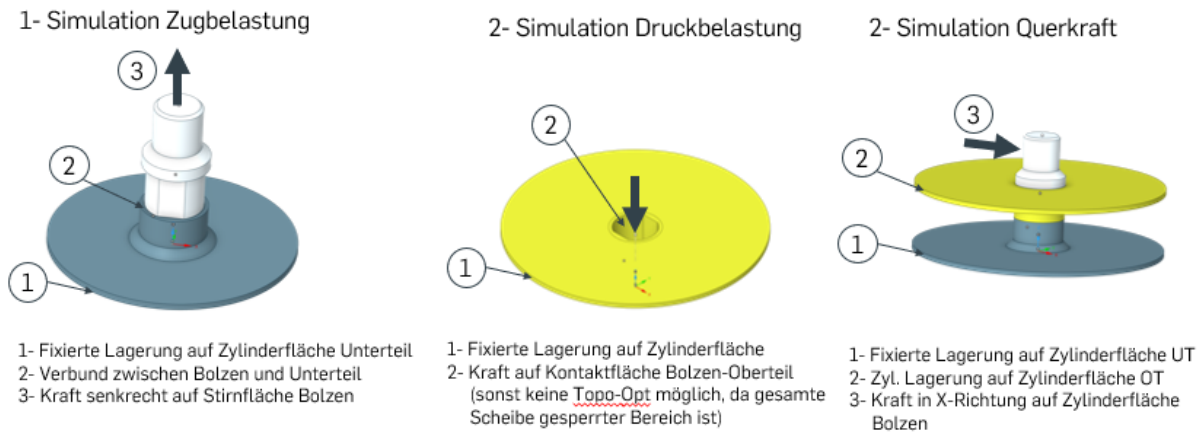


Abbildung 21: Lastfälle und Randbedingungen der FE-Analyse

In der Berechnung wurden die folgenden Varianten betrachtet:

- Ausgangsvariante \varnothing 110 mm und 2 mm Materialstärke
- Dünne Variante \varnothing 110 und 2 mm Materialstärke
- Kleine Variante \varnothing 80 mm und 2 mm Materialstärke

Die Berechnungen ergaben bei einem geringeren Scheibendurchmesser von 80 mm und gleichzeitiger Topologieoptimierung, eine geringere Durchbiegung als bei dem größeren Durchmesser von 110 mm. Dies ist bei allen Beanspruchungen der Fall. Damit kann der Scheibendurchmesser auf 80 mm verkleinert werden und die Geometrie ähnlich der Topologieoptimierung angepasst werden. In Abbildung 22 sieht man die berechnete Scheibe und in Abbildung 23 die konstruktiv angepasste Scheibe

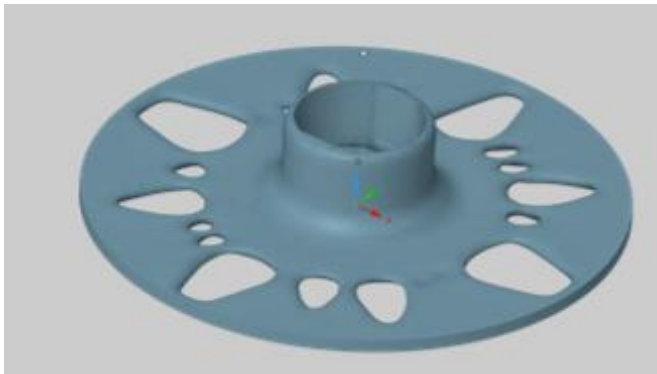


Abbildung 22: Topologieoptimierung

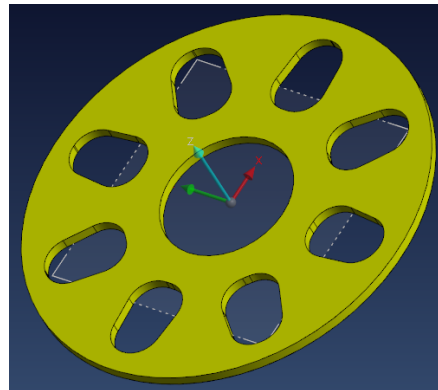


Abbildung 23: angepasste Konstruktion der Scheibe

Durch die Topologieoptimierung und Verkleinerung des Durchmessers der Scheibe konnten gegenüber der Ausgangsvariante in der gesamten Baugruppe 33 % Gewicht eingespart werden. Dies wird nochmal durch in Abbildung 24 verdeutlicht.

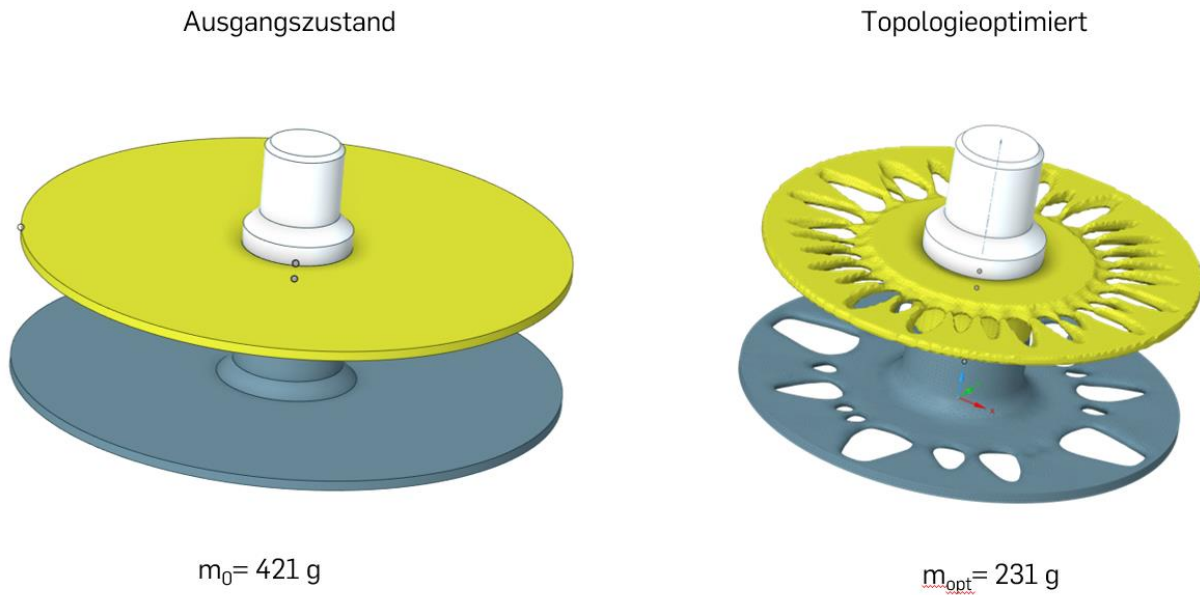


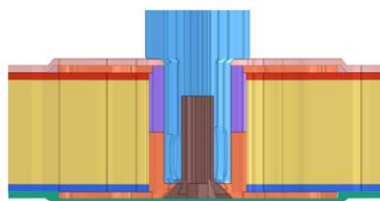
Abbildung 24: Vergleich Ausgangsvariante und Topologieoptimiert

1.1.8 Endversion des Metalleinlegers

Nach einer durchgeführten Topologieoptimierung sowie einer mehrfachen FEM-Analyse der Metalleinleger-Baugruppe wurde die Endversion des Metalleinlegers gefertigt. Diese wurde anschließend wieder einer mechanischen Prüfung unterzogen. Die Ergebnisse werden in der folgenden Abbildung 25 dargestellt.

Versuchsreihe	Zug-Biegeversuch	Druck-Biegeversuch	Schubversuch
Mittelwert Erstversagen	15,6 kN	10,5 kN	24,6 kN
Schadensbild Erstversagen	 <p>Schubriss in Sandwichkern</p>	 <p>Ablösen des unteren Metalltellers von GFK-Decklage</p>	 <p>Delamination zwischen GFK-Laminatschichten</p>

- Erstversagen bei Zug-Biegung und Schub deutlich über erforderlichem Kraftniveau
- Druck-Biegeversuch mit vergleichsweise niedriger Kraft bei Erstversagen
- Druck-Biegung entspricht -3g-z-Lastfall laut DIN EN 12663 und stellt damit den „wichtigsten“ Lastfall dar
- **Empfehlung zur Steigerung des Kraftniveaus:** Hinzufügen von 2 GFK-Decklagen à 1 mm auf unterem Metallteller (siehe Abb. rechts)



Vorgeschlagener lokaler Lagenaufbau:

- GF-BD (1 mm Saertex) 0°/90°
 - GF-BD (1 mm Saertex) ±45°
 - Metallteller
 - GF-BD (1 mm Saertex) 0°/90°
 - GF-BD (1 mm Saertex) ±45°
 - Schaumkern (29 mm 3D-Core)
 - GF-BD (1 mm Saertex) ±45°
 - GF-BD (1 mm Saertex) 90°/0°
 - Metallteller
 - GF-BD (1 mm Saertex) ±45°
 - GF-BD (1 mm Saertex) 90°/0°
- ← zusätzliche GFK-Decklagen auf unterem Metallteller

Abbildung 25: Auswertung zweiter mechanischer Test

In Tabelle 3 sind die konstruktiven Veränderungen sowie die Materialanpassungen der Metalleinleger-Baugruppe dargestellt:

Tabelle 3: Konstruktive Anpassungen

Beschreibung	Ausgangsvariante	Konstruktive Anpassungen
Scheibendurchmesser	Ø 110 mm	Ø 80 mm
Aussparungen in Scheibe	Kleine Bohrungen	Große Langlochbohrungen
Bolzen Geometrie		Wurde entsprechend der Berechnungen und den Montagevorgaben angepasst
Schweißensätze		Wurde entsprechend der Berechnungen und den Montagevorgaben angepasst
Scheiben Werkstoff	DD11	S355
Schweißensatz Werkstoff	S235	S355
Bolzen Werkstoff	C45	1.6580
Härte Bolzen	ungehärtet	47 HRC

In der folgenden Abbildung 26 sieht man die Endversion des Metalleinlegers.

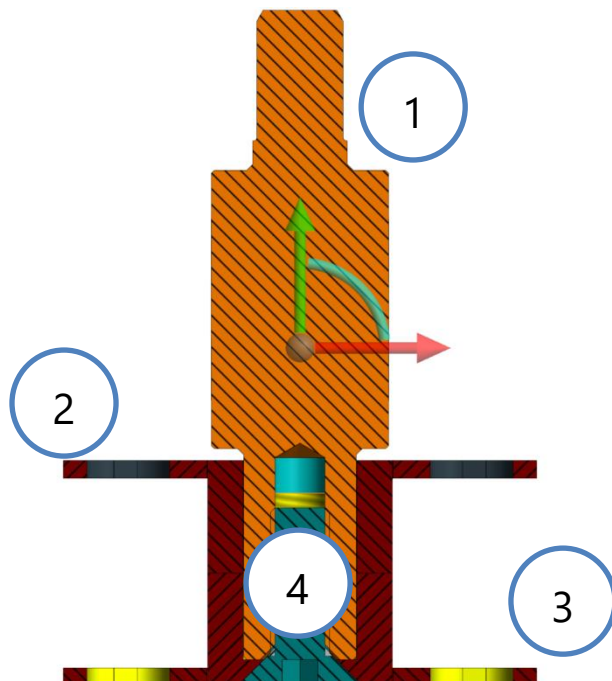
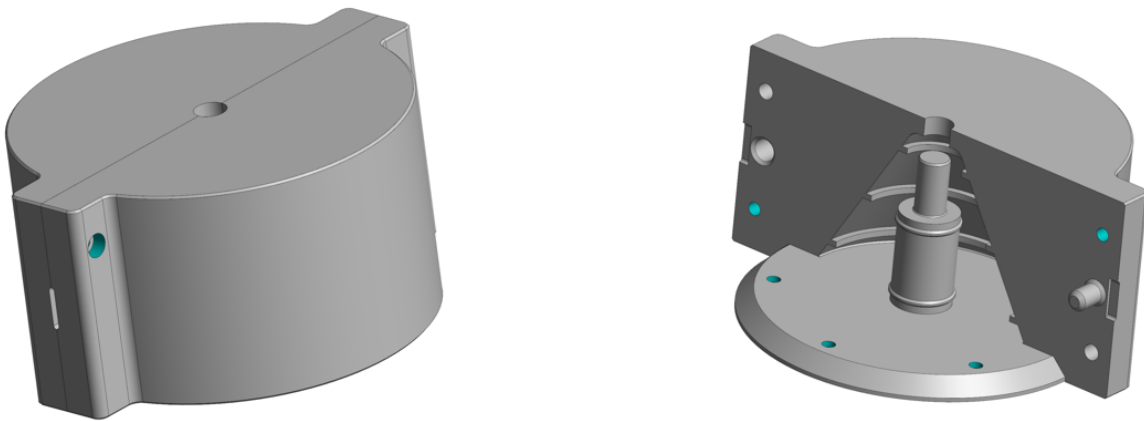


Abbildung 26: Endversion Metalleinleger

1: Bolzen; 2: Obere Metalleinleger; 3: Untere Metalleinleger; 4: Fixierschraube

1.1.9 Einbau des Metalleinlegers in die Dachstruktur

Der Metalleinleger wird im Herstellprozess der Dachstruktur von oben in die Arbeitsform gesteckt. Damit der Metalleinleger bzw. der Bolzen besser aus der Arbeitsform entformt werden kann, ist ein Silikonkegel entwickelt worden, welcher über den herausstehenden Bolzen gesteckt wird. Für die Herstellung des Silikonkegels ist ein Gießwerkzeug mithilfe eines 3D-Druckers gefertigt worden. Mit dieser Form wurden die ersten und auch passenden Silikonkegel produziert. Die Gießform ist wiederverwendbar und kann für die Produktion von weiteren Silikonkegeln verwendet werden. In Abbildung 27 sieht man die gedruckte Gießform.



- Konstruktion Gießform für Silikonhut

Abbildung 27: Gießform

Der Montageablauf des Metalleinlegers in Kurzform:

1. Silikonkegel auf Bolzen stecken
2. Silikonkegel & Bolzen in Arbeitsform an die vorgesehene Stelle stecken
3. GFK-Matten in das Werkzeug legen
4. Bolzen frei machen (GFK-Matten lochen)
5. Metalleinleger Oberteil montieren
6. Schaum einlegen
7. Metalleinleger Unterteil montieren
8. Schraube fest anziehen

Unter 1.1.5 Aufbau Dachsegment und der Abbildung 14: Aufbau Dachsegment mit Metalleinleger ist das Schema der Dachstruktur und das Prinzip bildlich dargestellt. Die folgende Abbildung 28 zeigt den Metalleinleger mit aufgestecktem Silikonkegel.

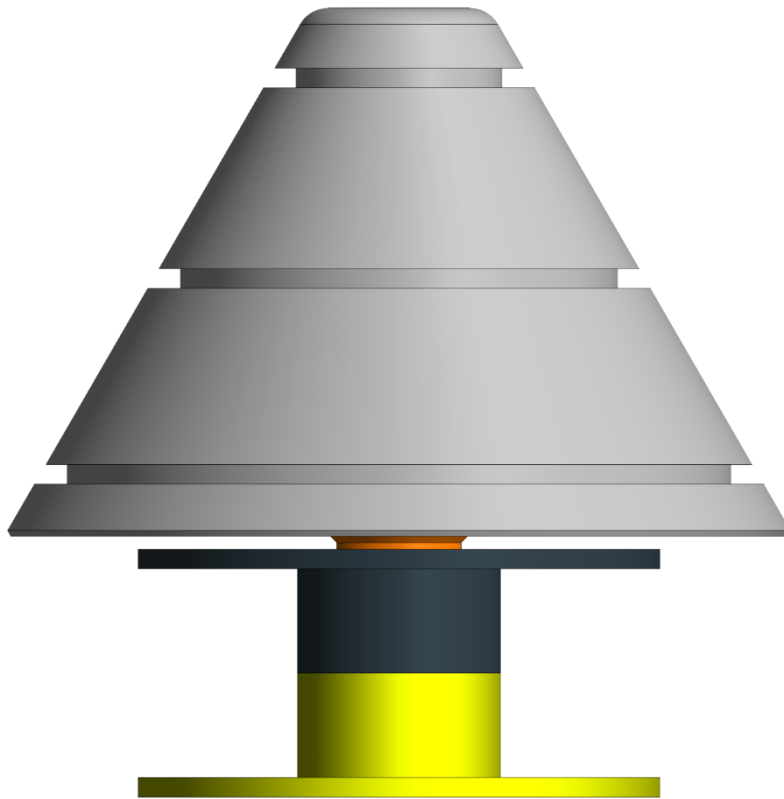
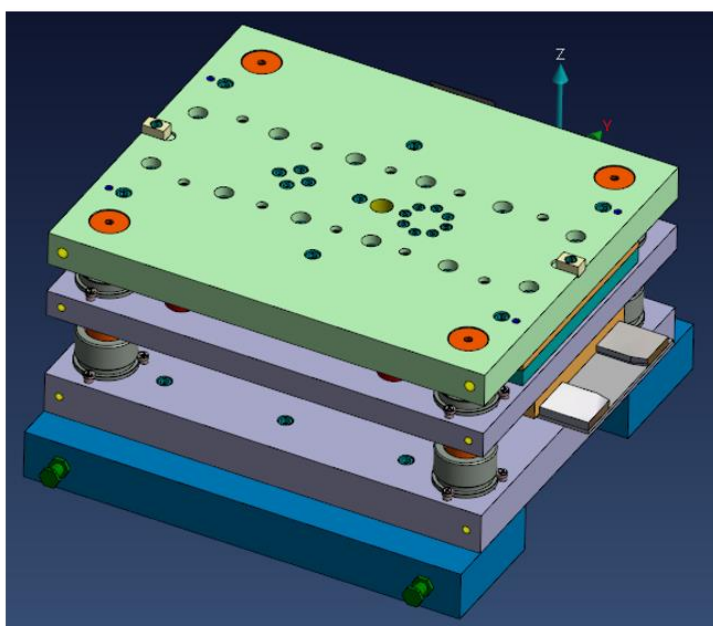


Abbildung 28: Metalleinleger mit aufgestecktem Silikonkegel

1.1.10 Stanzkonzept

Auf Basis der Erkenntnis aus den Berechnungen der Scheibe wurde ein Stanzwerkzeug für die Serienproduktion entwickelt. Das Serienwerkzeug ist ein sogenanntes Folgeverbundwerkzeug. Das bedeutet, dass der Metalleinleger bzw. die Scheibe des Metalleinlegers in mehreren aufeinander folgenden Stufen gefertigt wird (siehe Abbildung 30). Mit diesem Verfahren werden die Scheiben für den oberen und unteren Metalleinleger hergestellt.



- Werkzeugtyp:
Folgeverbund für
Serienfertigung
- Werkzeuggröße:
600x600x350 mm
- Benötigte Presskraft:
1000 kN/ 100 t
- Vorschubschritt: 90 mm
- Werkzeugart:
Säulengestell mit
gefederter Führungsplatte

Abbildung 29: Stanzwerkzeug Metalleinleger

▪ Streifenlayout mit 5 Folgen

- 1. Folge: Sucherloch stanzen
- 2. Folge: Aussparungen stanzen
- 3. Folge: Lochstempel für Einsatz
- 4. Folge: Platinenschnitt
- 5. Folge: Abfallschnitt/trennen

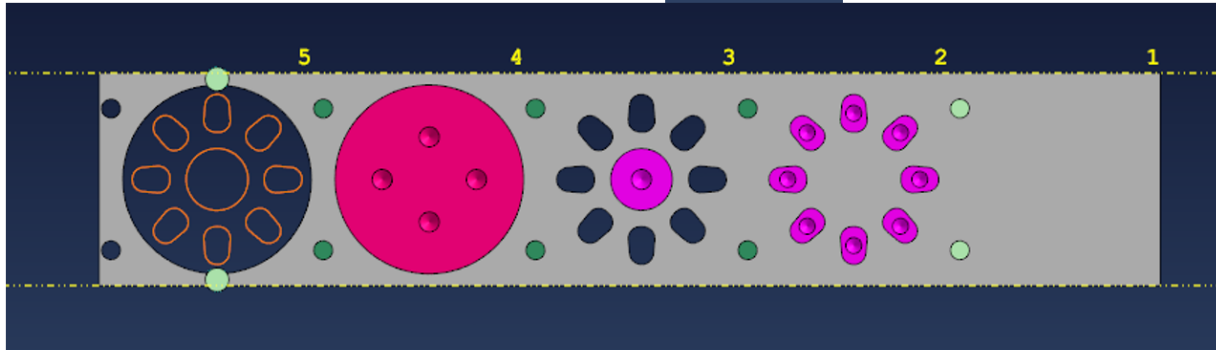
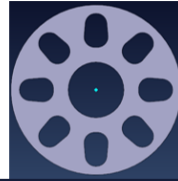


Abbildung 30: Stanzfolge im Werkzeug

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die zahlenmäßigen Nachweise können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 4: Kosten Nachweis

Pos.	Bezeichnung	Entstandene Kosten	Gesamtvorkalkulation
01	Personalkosten 0837	119.275,23 €	131.440,60 €
02	Materialkosten 0813	6.156,24 €	15.330 €
03	Reisekosten 0838	1.570,04 €	3.260 €
04	Investitionen 0847	-	5.833,30 €
05	Sonstige 0850	4.370,00 €	25.100 €

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es konnte gezeigt werden, dass zur Erreichung der Projektziele ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand notwendig war. Der damit verbundene finanzielle Aufwand war durch die Projektteilnehmenden nicht ohne Förderung zu erbringen. Aufgrund der Komplexität der angestrebten Entwicklung und des innovativen Charakters des Vorhabens bestand zu Projektbeginn ein hohes wissenschaftlich-technisches und damit auch wirtschaftliches Risiko. Vor Projektbeginn war ein integratives Leichtbaudach entsprechend der Projektzielstellung nicht realisiert worden. Entsprechend neuartig und mit technischen und technologischen Risiken behaftet waren demzufolge auch die Teilprojekte. Die zu erbringenden Eigenanteile, die ihrerseits für die Projektteilnehmenden ein hohes Risiko darstellten, erforderten ein hohes Verantwortungsbewusstsein und besondere Qualitäten bei der Planung und Durchführung. Durch die Expertise aller Projektteilnehmenden sowie die systematische, zielgerichtete Zusammenarbeit, konnte die Zuwendung zielführend und angemessen eingesetzt werden und hat maßgebend zum Erfolg des Projektes beigetragen.

4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das erlangte Wissen und die Erkenntnisse können für zukünftige Projekte genutzt werden.

Auch das technische Know-how zur Herstellung von Metalleinlegern kann in anderen Bereichen des Unternehmens angewendet werden, somit können in Zukunft auch beispielsweise hochfeste Verbindungen unseren Kunden angeboten werden.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es ist nicht bekannt, dass integrative FKV-Dächer für Schienenfahrzeuge bei anderen Stellen entwickelt wurden.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

In Zusammenarbeit mit allen Partnern wurde ein Messedemonstrator hergestellt (Teilsegment des FKV-Daches). Dieser wurde auf einem Gemeinschaftsstand bei der folgenden Messe ausgestellt und beworben:

15th International Railway Fair; 19.09.2024 – 22.09.2024; Danzig, Polen.

Zudem wurde eine Projekthomepage erstellt:

<https://www.iwu.fraunhofer.de/de/projekte/integratives-leichtbaudach-fuer-schiene-fahrzeuge.html>

III. Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage

IV. Kurzfassung (Berichtsblatt)

Siehe Anlage

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel INTEGRAL – Integratives Leichtbaudach für Schienenfahrzeuge Teilvorhaben: Bauteilauslegung, Umsetzung und Integration	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kothe, Benjamin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2024
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ARNELL Arno Hentschel GmbH Drausendorfer Straße 2 02763 Zittau	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I20009C
	11. Seitenzahl 26
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 30
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 28.06.2024	
18. Kurzfassung <u>Stand der Wissenschaft und Technik</u> Konventionelle Dachstrukturen im Schienenfahrzeugbau bestehen aus Stahl- oder Aluminiumträgern. Die Dachabdeckung bildet eine versteifte Schale in Stringer- oder Sandwichbauweise, die mit der metallischen Tragstruktur verschweißt oder dicht verklebt ist. Die hohe Teilevielfalt der Einzelkomponenten führt zu einem großen Montageaufwand und zu einer hohen Masse, was sich insbesondere bei Nahverkehrszügen und Straßenbahnen durch die häufige Beschleunigung des Fahrzeuges negativ auf den Energieverbrauch auswirkt. Darüber hinaus wachsen die Anforderungen hinsichtlich der Verringerung des Wartungsaufwandes, zur Steigerung der Transportkapazität sowie zur Erhöhung der Reichweite von netzunabhängigen Fahrzeugen. <u>Zielsetzung</u> Das Verbundvorhaben hatte als Hauptziel die Entwicklung von wettbewerbsfähigen Schienenfahrzeugdächern in Faserkunststoffverbundbauweise mit spezifischen Merkmalen im Vergleich zu herkömmlichen metallischen Dachstrukturen. Dabei sollten 40 % Gewichtseinsparung bei gleichbleibenden Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften erreicht werden. Eine kompakte und funktionsintegrierte Bauweise des Faserkunststoffverbundes mit einem um 70 % geringeren Montageaufwand wurde angestrebt. <u>Ergebnisse</u> Es wurde ein integrativer Metalleinleger für Faserkunststoffverbund-Leichtbauweisen, speziell für ein Schienenfahrzeugdach entwickelt. Dieser Metalleinleger wird in einem speziellen Verfahren in die Faserkunststoffverbundstruktur (FKV- Struktur) des Daches eingebettet. Es wurden mehrere FE-Analysen und Belastungstests durchgeführt, ein Montageablauf für die Metalleinleger in die FKV-Struktur entwickelt sowie ein Folgeverbundwerkzeug für die Produktion der Einzelteile des Metalleinlegers konstruiert.	
19. Schlagwörter Schienenfahrzeuge Leichtbau, Faser-Kunststoff-Verbund, Straßenbahndach, Funktionsintegration, Vakuuminfusion	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
3. title INTEGRAL – Integrative lightweight roof for rail vehicles Sub-project: Component design, implementation and integration	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kothe, Benjamin	5. end of project 31.12.2023 6. publication date 28.06.2024 7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) ARNELL Arno Hentschel GmbH Drausendorfer Straße 2 02763 Zittau	9. originator's report no. 10. reference no. 19I20009C 11. no. of pages 26
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 3 14. no. of tables 4 15. no. of figures 30
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 28.06.2024	
18. abstract <u>State of the art in science and technology</u> Conventional roof structures in rail vehicle construction consist of steel or aluminium girders. The roof cover forms a stiffened shell in stringer or sandwich construction, which is welded to the metallic supporting structure or tightly glued. The high variety of parts of the individual components leads to a great deal of assembly effort and a high mass, which has a negative effect on energy consumption, especially in local trains and trams, due to the frequent acceleration of the vehicle. In addition, the requirements for reducing maintenance costs, increasing transport capacity and increasing the range of off-grid vehicles are growing. <u>Objective</u> The main objective of the joint project was to develop competitive rail vehicleroofs in fibre plastic composite construction with specific characteristics compared to conventional metallic roofstructures. The aim was to achieve 40 % weight savings while maintaining the same strength and stiffnessproperties. The aim was to achieve a compact and functionally integrated design of the fibre-reinforced plastic composite with a 70% reduction in assembly costs. <u>Results</u> An integrative metal insert for fibre plastic composite lightweight construction methods has been specially developed for a rail vehicle roof. This metal insert is embedded in the fibre plastic composite structure (FRP structure) of the roof in a special process. Several FE analyses and load tests were carried out, an assembly process for the metal inserts in the FRP structure was developed and a progressive tool was designed for the production of the individual parts of the metal insert	
19. keywords Rail Vehicles Lightweight Construction, Fiber-Plastic Composite, Tram Roof, Functional Integration, Vacuum Infusion	
20. publisher	21. price